



TITLE:

実測位相の力学的解析に基づくリズム現象の縮約記述に関する理論的考察(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

今井, 貴史

CITATION:

今井, 貴史. 実測位相の力学的解析に基づくリズム現象の縮約記述に関する理論的考察. 京都大学, 2017, 博士(情報学)

ISSUE DATE:

2017-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20514>

RIGHT:

京都大学	博士（情報学）	氏名	今井 貴史
論文題目	実測位相の力学的解析に基づくリズム現象の縮約記述に関する理論的考察		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文では、リズム現象の数理モデルとして一般に用いられているリミットサイクル振動子およびカオス振動子に関して、新たな縮約理論が提案されている。また、その理論を応用した</p> <ul style="list-style-type: none">・ リミットサイクル振動子の位相感受性を計測するための方法の開発・ カオス振動子の同期特性が決定されるメカニズムについての考察 <p>が行われている。</p> <p>第1章では、リズム現象の解析における縮約記述の必要性が述べられ、また、縮約理論およびそれに関連する理論の現状が概説された後、本論文の概要が述べられている。</p> <p>第2章では、リミットサイクル振動子に対する代表的な縮約記述である位相記述について、その理論的基礎が、本論文の内容に深く関係するものに絞ってまとめられている。すなわち、まず一般にリミットサイクル振動子のリズムダイナミクスが位相に関して閉じた方程式で記述できるということが示され、続いて具体的にStuart-Landau振動子に対する縮約方程式が導出されている。</p> <p>第3章では、リミットサイクル振動子の位相感受性を特徴づける位相応答曲線について、それを実験的に計測するための従来法が紹介されている。本論文では、特に随伴法、直接法、WSTA法という三つの従来法が取り上げられている。</p> <p>第4章では、リミットサイクル振動子に対する新たな縮約記述が導出されている。第3章で取り上げられた従来法のうち、WSTA法は、その高いノイズ耐性や計測環境の構築の容易さ等から、実験系への適用において非常に有用であると考えられている。しかし、一般的な状況を考えてみると、WSTA法では正しく計測できない場合がある。第4章では、まず、例としてStuart-Landau振動子へのWSTA法の適用結果が提示され、正しく計測できない事例が具体的に示される。そこでは、Stuart-Landau振動子に対する適用結果が精査され、WSTA法で正しく計測できない原因は、位相変数の定義が実験と理論とで異なることに最終的に起因することが示される。すなわち、位相記述の理論で採用されている位相の定義が実験において使いやすいものではないために、実験においてはそれとは異なる（一見近似的に問題無いと思われる）定義が採用され、それが結果としてWSTA法で正しく計測できない原因になっている。そこで、これらの問題を解決するため、実験の状況に即した定義の位相を状態変数として採用する新たな縮約記述の理論を考え、計測手法の改良を行った。この新たな縮約記述はリミットサイクル振動子に対して伝統的位相記述の代わりとして働き、位相応答曲線の計測手法を開発するための基礎となっている。この章の最後に、McWSTA法という新たな計測手法を実際に開発する取り組みが示されている。</p> <p>第5章では、McWSTA法を実験系に適用した例が紹介されている。適用対象としては、発振電気回路およびヒトの歩行が取り上げられている。</p> <p>第6章では、McWSTA法をカオス振動子に適用することで得られた計測曲線（リミットサイクル振動子に適用した場合の位相応答曲線に相当）を用いて、アーノルドの舌（同期の起きる外力の振動数と振幅の範囲を表す相図）の再現を試みた数値実験の結果とが示されている。位相記述は本来リミットサイクル振動子を対象としたものであるが、数値実験の結果は、McWSTA法により得られた計測曲線が“カオス振動子の位相応答曲線”と呼ぶべき性質を備えていることを示している。これは、位相記述の適用対象をカオス振動子に拡張できる可能性があることを示している。</p>			

第7章では、第6章での考察を踏まえ、カオス振動子に対する縮約理論が構築されている。また、その縮約理論を典型的なカオス振動子に適用した結果をもとにして、カオス振動子の同期特性が決定されるメカニズムについての考察が行われている。

第8章では、本論文の結論として、本研究の成果とその意義がまとめられている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、リミットサイクル振動子およびカオス振動子に対する新たな縮約理論の構築が行われ、さらにその理論の具体的応用について論じられている。リズム現象、すなわち固有のリズムで同様の事象が繰り返される現象は、自然界・生体内など、さまざまなところで見られる。それらリズム現象を数理的に解析しようとするとき、まずリミットサイクル振動子やカオス振動子として系をモデル化することになるが、詳細なモデル化から得られるリミットサイクル振動子やカオス振動子は一般に非線形かつ大自由度であるため、そのままでは解析が困難であり現象の本質を見極めるのに適しているとは言えない。そこで、何らかの単純化を行うことが重要になる。リミットサイクル振動子に対しては位相記述とよばれる縮約記述がすでに知られており広く用いられているが、そこで採用されている状態変数の定義は実験において使いやすいものではなく、それとは異なる定義が実験で採用されることにより理論と実験の結果の食い違いがしばしば生じている。また、カオス振動子に対しては、カオス振動子特有の本質的な性質を十分に再現できる縮約記述は未だ知られていない。

本論文の研究では、これらの状況を考慮して新たな縮約理論の構築を行っている。第1の研究では、リミットサイクル振動子の縮約において状態変数として実測上の位相を採用し、縮約理論の実験への応用を容易にした。理論解析における簡便さだけでなく実験との対応のとりやすさまで考慮した縮約理論というのは、これまで明示的に提案された研究は無く、評価できる。特に、単に縮約理論を構築するだけでなく、新たな計測手法（複数サイクル重み付きスパイクトリガー平均法：**Multicycle Weighted Spike-Triggered Average Method**：以後**McWSTA**法と呼ぶ。）の開発という縮約理論の具体的応用にまで到達している点は、高く評価できる。さらに、理論を提唱するだけでなく、電気回路を用いた実験で手法の有効性の検証も行っており、この点も高く評価できる。考案された理論が、実験では外乱等で上手く適用できない場合が良くあるが、検証結果から提案された本論文の計測手法（**McWSTA**法）は優れたノイズ耐性をもつことが示され、現実のデータ解析での有効性も確認されている。

第2の研究では、カオス振動子の縮約理論という難しい挑戦的課題に取り組んでいる。カオス振動子のリズムダイナミクスを記述するモデルとしては先行研究で提案されたトイモデルがすでに知られているが、カオス的なダイナミクスを単なるノイズとして近似する等、十分にカオスの特性を取り入れた系統的な縮約理論とはとても言えないものであった。本研究では、位相記述のアイデアを用いながらも、位相以外の状態変数が位相の時間発展に与える影響を無視せず取り込んだ。新たに構築された縮約理論により、カオス振動子の同期特性が決定されるメカニズムを新たな視点から理解することができるようになった。例えば、カオス振動子の位相に見られる短い時間スケールでの揺らぎや振幅方向に関係する分岐現象が同期特性にどのような影響をもたらすかが明らかになった。新たに構築した縮約理論を用いることで、従来の理論では困難であった同期現象におけるカオス特有の力学的特性を取り込むことに成功しており、新規性のある研究結果として高く評価できる。

上記の研究内容は、リズム現象に関する実データを非線形力学の知見を用いて理解する理論的基礎を与え、カオス同期など従来は十分に理論的に解析が進んでいなかった課題の解決への大きな一歩と言える研究成果である。結論として、本論文は、博士（情報学）の学位論文として、価値あるものと認める。また、平成29年2月24日に論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。

Webでの即日公開を希望しない場合は、以下に公開可能とする日付を記入すること。
要旨公開可能日： 年 月 日以降